

MODELADO, SIMULACIÓN Y MEDIDA DE LA COMPRESIÓN EN LNAs PARA APLICACIONES DE ASTRONOMIA

F. J. CASAS⁽¹⁾, J. P. PASCUAL⁽²⁾, J. PORTILLA⁽³⁾, M. L. DE LA FUENTE⁽²⁾, B. AJA⁽²⁾, E. ARTAL⁽²⁾

casas@ifca.unican.es, pascualp@unican.es, joaquin.portilla@ehu.es

⁽¹⁾ Instituto de Física de Cantabria, CSIC-Universidad de Cantabria, Avenida los Castros s/n, 39005, Santander, Spain.

⁽²⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Avenida los Castros s/n, 39005, Santander, Spain.

⁽³⁾ Dpto. de Electricidad y Electrónica. Universidad del País Vasco. Apartado 644, 48080 Bilbao, Spain.

Abstract- In this work, system level modelling and realistic simulation and measurement results of a 31 GHz Back-End Module (BEM) Low-Noise Amplifier (LNA), designed for the QUIJOTE CMB (Q U I JOint TEnerife CMB) experiment radiometer, are reported. The signals received by radiometers can be identified as continuous spectre gaussian white noise signals. This makes necessary time-domain simulation techniques and appropriate models for the realistic analysis of radiometers behaviour. The measured-based modelling of one BEM's LNA, its simulation in nominal conditions and the measurement of the nonlinear characteristic by using filtered white noise excitation signals, will be shown. Typically, in the LNAs design process the linearity is not taken into account but, as we will see, in the radiometers case, the nature of gaussian noise excitation signals makes amplifiers to present higher nonlinearity in their characteristics than when using single tone excitation signals. Therefore, in order to analyze the suitability of the LNAs nominal operation, linearity figures of merit have to be obtained, but using realistic excitation signals. In this paper, the LNAs nonlinear characteristics with gaussian noise excitation signals have been obtained by simulation and measurement.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta el modelado a nivel de sistema, la simulación y la medida de la compresión de un amplificador de bajo ruido (Low Noise Amplifier - LNA) que forma parte del módulo posterior (Back-End Module - BEM) de un radiómetro. Dicho radiómetro ha sido diseñado para el experimento QUIJOTE CMB [1] y va a ser montado en tres antenas que se van a instalar en el observatorio del Teide (Tenerife). El experimento pretende medir la polarización del Fondo Cósmico de Microondas (Cosmic Microwave Background - CMB), para complementar y corregir las medidas obtenidas por el satélite PLANCK [2-3]. La primera antena tiene cinco receptores en su plano focal: dos en la banda de 10 GHz -14 GHz, dos en la de 14 GHz - 20 GHz y uno entre 26 GHz y 36 GHz. El prototipo del BEM para esta última banda de frecuencia se ha diseñado en el Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones de la UC (DICOM) y es el que utiliza el LNA que ilustra el presente trabajo.

Debido a la complejidad y el coste computacional del modelado y la simulación de los receptores radiométricos, en la práctica esta tarea suele ser simplificada, utilizando modelos ideales y pruebas de un solo tono, dando lugar, en general, a resultados poco concluyentes. Sin embargo la simulación de este tipo de receptores y sus subsistemas podría evitar muchos ciclos de diseño y fabricación, usando modelos precisos y reducidos que den lugar a resultados realistas con un coste computacional razonable en términos de tiempo de simulación y consumo de recursos. En este trabajo proponemos el uso de técnicas de reducción del orden de modelos, presentadas y utilizadas en trabajos previos [4] para el modelado y simulación de subsistemas transmisores y receptores de comunicaciones móviles. Estas técnicas resultan especialmente útiles en el marco de los receptores radiométricos, porque los modelos resultantes posibilitan la simulación en el dominio del tiempo, algo esencial cuando la señal de excitación del receptor es ruido blanco Gaussiano, de espectro continuo.

Por otro lado, los modelos obtenidos pueden ser complementados y mejorados aplicando técnicas para la incorporación de efectos degradantes del funcionamiento de un radiómetro, como la modulación de ganancia o el ruido 1/f [5]. De esta forma es posible obtener las figuras de merito del receptor en condiciones realistas y determinar si el comportamiento del BEM y sus subsistemas es el adecuado y cumple las especificaciones que se requieren, en particular, en el experimento QUIJOTE.

El resto del artículo se organiza como sigue: En la Sección II se presenta la estructura del BEM y el modelado del LNA que ilustra el presente trabajo. La Sección III se dedica a la simulación del LNA en condiciones nominales de operación. En la Sección IV, se obtienen las características no lineales del LNA en condiciones realistas, tanto en simulación como en medida y se comparan con las características típicas de un solo tono. Finalmente, en la sección V se citan algunas conclusiones.

II. MODELADO DEL LNA

La Figura 1 muestra un esquema simplificado del BEM del experimento QUIJOTE. Esta estructura es un prototipo por lo que la estructura final podría variar algo, aunque básicamente la estructura se mantendría. La banda de frecuencia de funcionamiento va de 26 a 36 GHz. Se conectan en serie dos LNAs monolíticos comerciales, debido a requerimientos de ganancia.

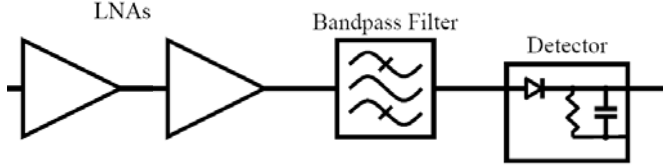


Fig. 1. Estructura simplificada del BEM del experimento QUIJOTE

En particular, el AMMC-6241 de Avago Technologies se sitúa a la entrada del BEM, seguido de un segundo LNA, el ALH-140 de NGST. Este artículo se centra en el primer LNA para ilustrar el trabajo.

Por otro lado, el filtro y el detector a diodo han sido diseñados y fabricados en tecnología híbrida en el DICOM.

A. Modelado del AMMC-6241

Se ha utilizado un modelo caja-negra tipo Wiener para el LNA [6]. Este modelo consiste en la conexión en serie de un circuito eléctrico equivalente simplificado, que reproduce la memoria pequeña señal del amplificador, con una no-linealidad sin memoria, que reproduce la característica no lineal AM-AM con un solo tono a la frecuencia central de trabajo del amplificador (31 GHz). Este bloque no lineal sin memoria se implementa mediante elementos específicos de la librería del simulador ADS de Agilent Technologies, logrando reproducir la característica no lineal obtenida mediante la medida del LNA. El comportamiento en pequeña señal de este bloque debe cumplir perfecta adaptación ($S_{ii} = 0$) y perfecta y bilateral transmisión ($S_{ij} = 1$), independientemente de la frecuencia. De esta forma las condiciones de adaptación vendrán determinadas por el filtro que caracteriza la dinámica lineal, afectada, a su vez, por la característica no lineal AM-AM. El modelo completo, al contrario que los basados puramente en parámetros [S] del circuito, no presenta problemas de convergencia en el dominio del tiempo, permitiendo la simulación no lineal de forma precisa.

El filtro lineal se obtiene mediante la aplicación de la técnica de modelado de sistemas lineales presentada en [3], obteniendo un filtro equivalente con la misma respuesta en frecuencia que la obtenida mediante medida de los parámetros [S] del LNA. En la Figura 2, se comparan los parámetros [S] medidos con un analizador de redes (trazo rojo) con los del modelo (trazo azul). Se pueden apreciar algunas discrepancias, pero teniendo en cuenta el gran ancho de banda a caracterizar y el ruido presente en los datos de la medida, se ha considerado una aproximación lo suficientemente buena. En cuanto a la característica no lineal, tal como se ha comentado anteriormente, ha sido obtenida mediante medida del LNA y se ha implementado en el simulador mediante un elemento específico de la librería.

III. SIMULACIÓN DEL LNA

En esta sección, se muestran los resultados de la simulación realista del AMMC-6241 en condiciones nominales. El amplificador es excitado con una señal de ruido blanco Gaussiano y previamente filtrado en banda para emular el paso de la señal procedente del cielo por el módulo frontal del radiómetro. La Figura 3 muestra esta señal de entrada. La parte superior de la figura muestra la señal en el dominio del tiempo y la inferior la correspondiente representación en el dominio de la frecuencia. La potencia de esta señal es de unos -53 dBm en condiciones nominales.

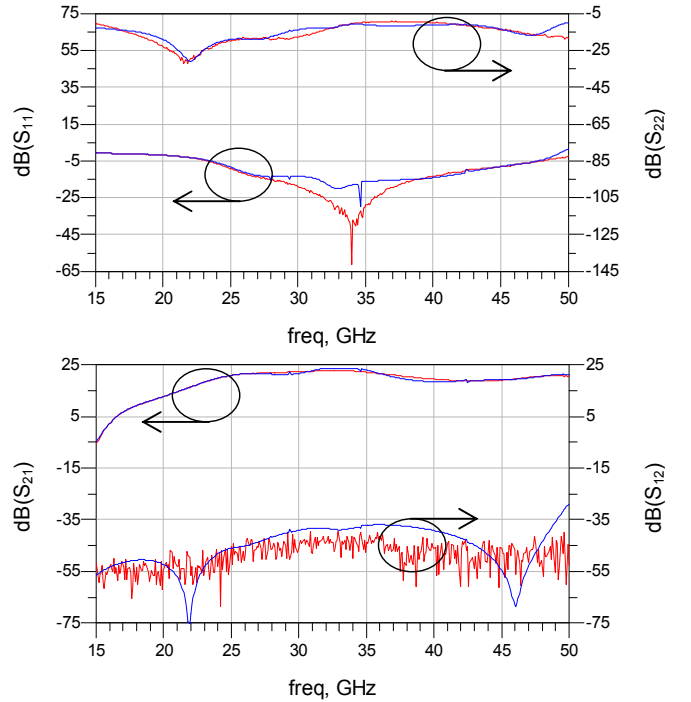


Fig. 2. Comparación de los parámetros [S] del LNA AMMC-6241. Medida: Trazo rojo. Modelo: Trazo Azul.

La Figura 4, por su parte, muestra la señal de salida del amplificador. La ganancia medida del LNA es aproximadamente de 18 dB, por lo que la potencia de salida es de unos -35 dBm. Observando el espectro de la señal de salida, no parece existir distorsión no lineal, por lo que parece que el LNA trabaja en régimen lineal. En cualquier caso, es muy importante conocer el punto de compresión de 1 dB real de este amplificador, para tener controlado de forma precisa el “back-off” de entrada que supone una potencia de entrada nominal de -53dBm.

IV. LINEALIDAD DEL LNA: CARACTERÍSTICAS NO LINEALES REALISTAS

Como se ha mencionado previamente, es necesario probar la linealidad del LNA en condiciones realistas, es decir con excitaciones del tipo ruido blanco Gaussiano. Este tipo de señales es muy diferente a las típicas señales sinusoidales usadas en las pruebas de un tono, o de las señales moduladas específicas para las pruebas de “recrescimiento espectral” (spectral regrowth).

Típicamente, las figuras de mérito que se suelen utilizar para medir la linealidad de un amplificador son la característica AM-AM y el punto de compresión de ganancia

de 1 dB con un solo tono de excitación, a la frecuencia central de operación. El problema surge cuando la naturaleza de la señal con la que trabaja el amplificador en condiciones nominales difiere mucho del tono sinusoidal con el que se han obtenido dichas figuras de mérito. Este es precisamente el caso que nos ocupa. Para ilustrar las diferencias entre los dos tipos de señales, la Figura 5 compara una señal de ruido blanco Gaussiano, filtrado en la banda que va de 26 a 36 GHz con un tono a 31 GHz.

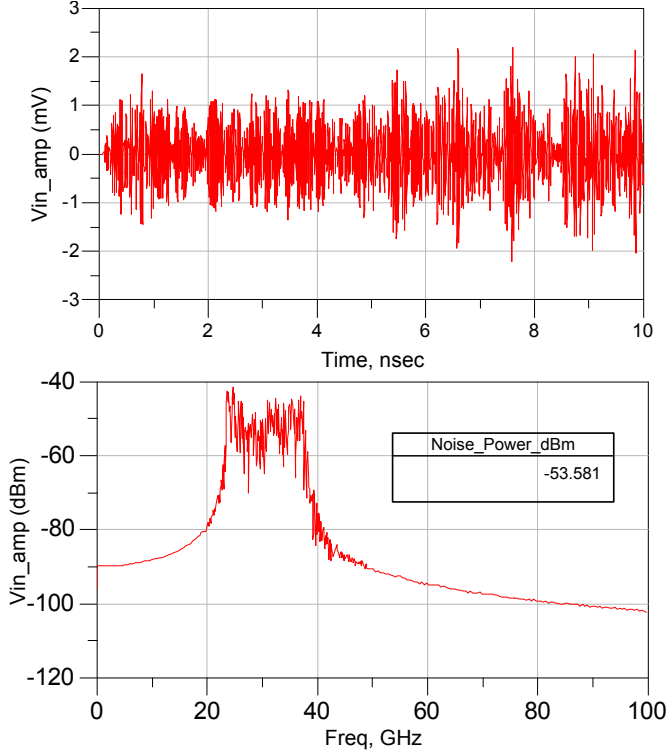


Fig. 3. Señal de entrada del AMMC-6241.

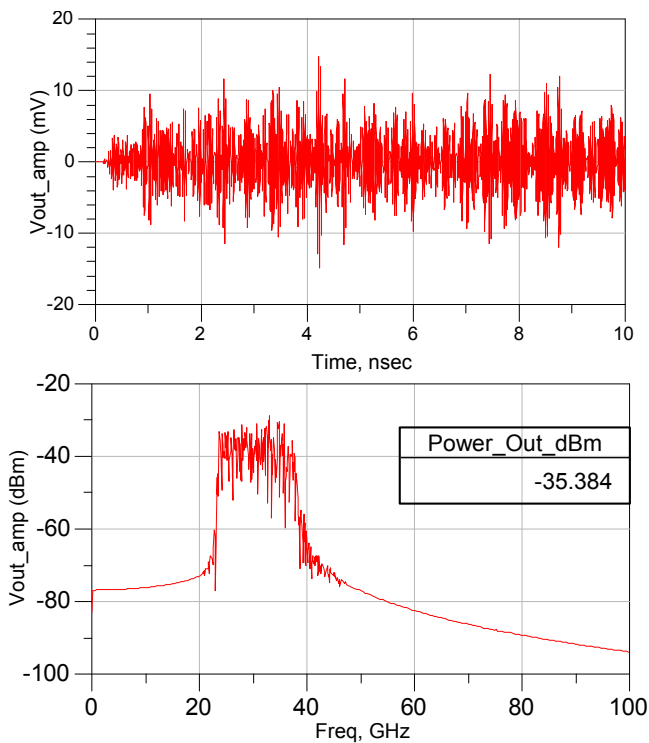


Fig. 4. Señal de salida del LNA AMMC-6241.

Ambas señales tienen una potencia media de -53 dBm, que corresponde a la potencia nominal de la señal de entrada del LNA que nos ocupa. La gráfica superior de la Figura 5 muestra el espectro de la señal de 1 tono, la gráfica inferior muestra el espectro de la señal de ruido gaussiano, y la gráfica central muestra la superposición de ambas señales en el dominio del tiempo, siendo el trazo azul el tono y el trazo rojo el ruido blanco filtrado en banda.

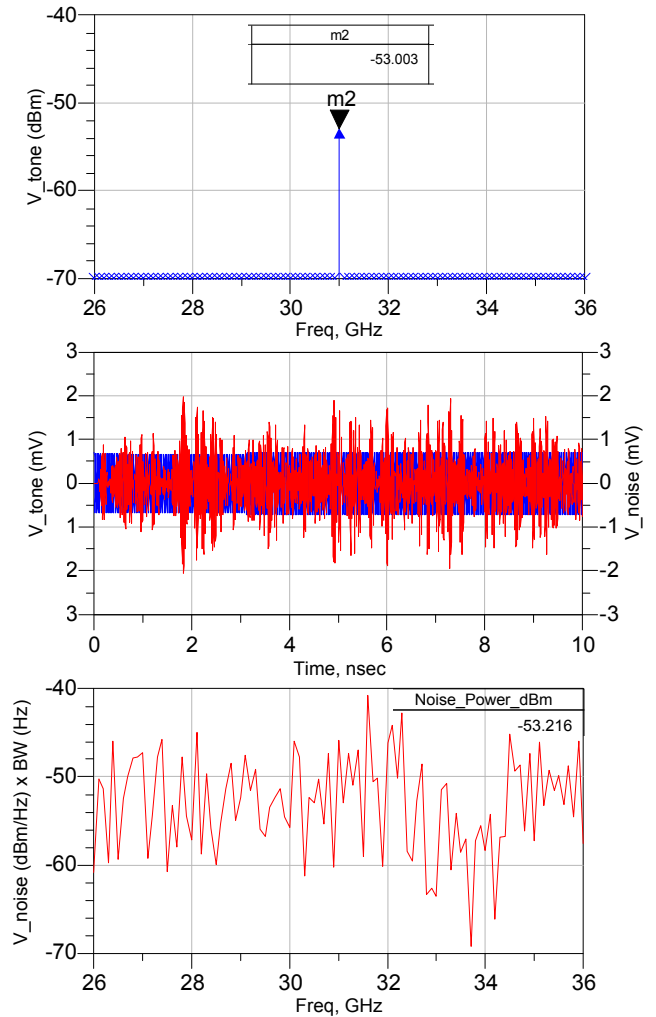


Fig. 5. Comparación entre un tono a 31 GHz y una señal de ruido blanco Gaussiano de 26 a 36 GHz.

Comparando las dos señales en el dominio de tiempo, la mayor diferencia son los picos presentes en la señal de ruido, menos frecuentes a mayor amplitud, debido a la Gaussianidad de la señal. Además, el espectro del ruido presenta también picos de potencia mucho mayor que la potencia media de la señal. Como veremos en las siguientes subsecciones, la presencia de estos picos provoca una compresión prematura del amplificador, resultando en un comportamiento más no lineal que el predicho por la característica no lineal AM-AM de 1 solo tono.

A. Compresión del AMMC-6241

La Figura 6 muestra la superposición de las características AM-AM obtenidas mediante simulación con un tono a la frecuencia central de trabajo (trazo rojo) y con ruido blanco Gaussiano de 26 a 36 GHz (trazo negro). Los marcadores muestran el punto de compresión de 1 dB para

cada caso. Se observa que con ruido blanco Gaussiano, el amplificador comprime un dB de ganancia con unos 5 dBm de potencia de entrada menos que con la señal típica de un tono.

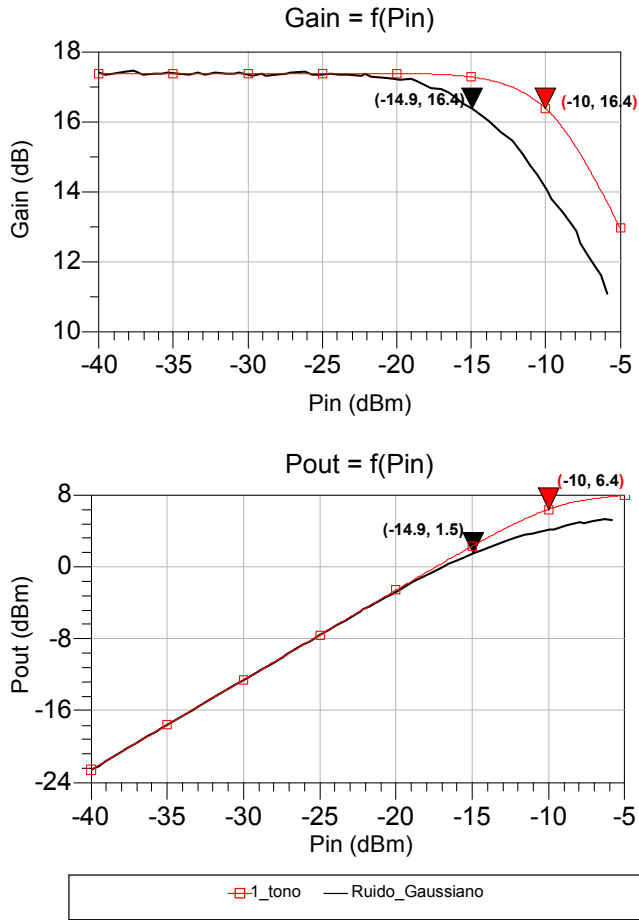


Fig. 6. Comparación entre las características AM-AM, obtenidas mediante simulación, con un tono a 31 GHz (rojo) y una señal de ruido blanco Gaussiano de 26 a 36 GHz (negro).

Para explicar este hecho de forma gráfica, la Figura 7 muestra las características Pin-Pout superpuestas a los valores de potencia instantánea de entrada y salida, cuando se excita el amplificador con un tono de -15 dBm (cuadrados en rosa) y cuando se utiliza una señal de ruido Gaussiano de -15 dBm (círculos en verde).

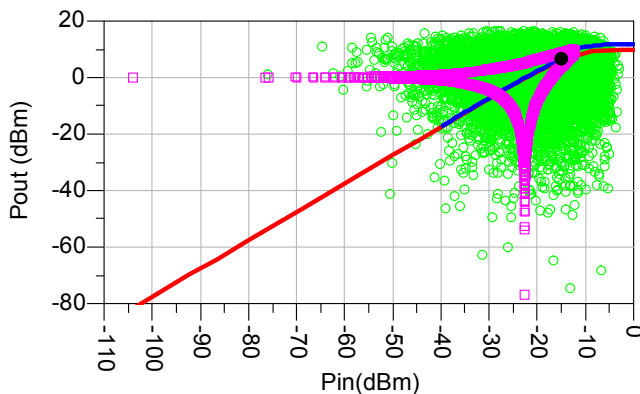


Fig. 7. Comparación entre los valores instantáneos de potencia de entrada y salida, cuando se utiliza como excitación del amplificador un tono a 31 GHz (cuadrados) y una señal de ruido blanco Gaussiano (círculos), con la potencia de entrada correspondiente al punto de compresión de 1 dB con el ruido Gaussiano ($P_{in} = -15$ dBm).

Los valores mayores de potencia instantánea de entrada y salida, en el caso de la señal de un solo tono, son claramente inferiores a los del caso de ruido Gaussiano, por lo que mientras que en el primer caso el amplificador trabaja todavía en régimen lineal, en el segundo ya se encuentra en el punto de compresión de 1 dB. En cualquier caso, teniendo en cuenta que, en el caso particular que nos ocupa, la potencia nominal de entrada a este amplificador es de -53 dBm, los 38 dB de “back-off” resultantes son claramente suficientes para asegurar el comportamiento lineal del LNA.

Por último, este comportamiento ha sido confirmado mediante medida en el laboratorio. Se han medido las características de la Figura 6, dando lugar a las de la Figura 8.

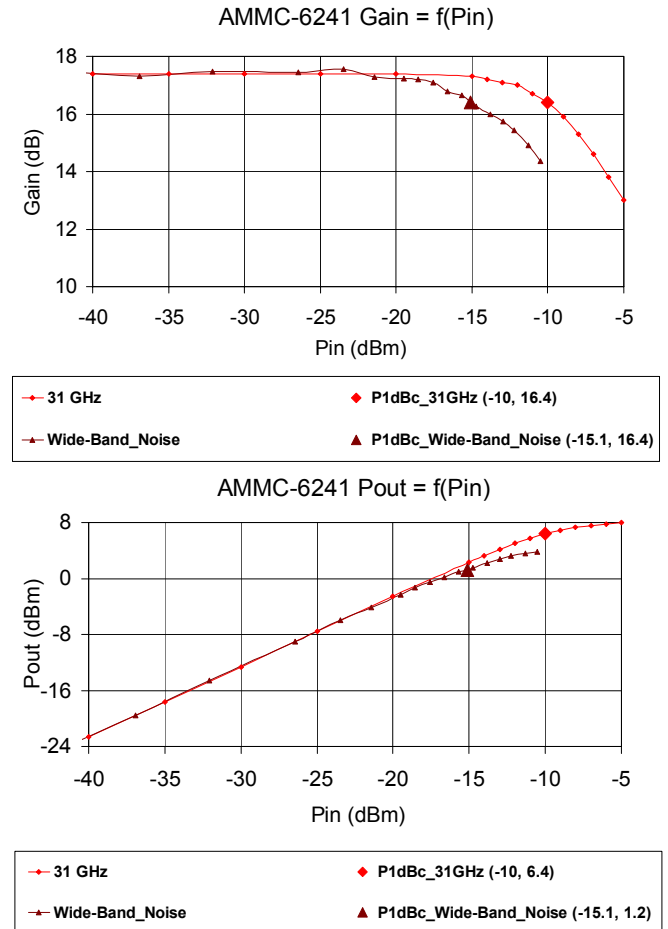


Fig. 8. Comparación entre las características AM-AM, obtenidas mediante medida, con un tono a 31 GHz (rombo rojo) y una señal de ruido blanco Gaussiano de 26 a 36 GHz (triángulo marrón).

Se observa como el comportamiento obtenido en simulación se corrobora de forma clara, obteniéndose puntos de compresión de 1 dB muy similares a los de simulación.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el modelado a nivel de sistema, la simulación en el dominio del tiempo y la obtención mediante simulación y medida de las características no lineales AM-AM de uno de los LNAs utilizados en el BEM del radiómetro diseñado para el experimento científico QUIJOTE CMB, que trata de medir la polarización del CMB. La técnica de modelado utilizada da lugar a modelos que posibilitan la obtención de resultados realistas con señales de excitación de ruido blanco

Gaussiano. Se ha mostrado que este tipo de excitación hace que los amplificadores se comporten de manera más no lineal que la predicha por el punto de compresión de 1 dB que se obtiene utilizando señales de un solo tono. En particular para el LNA que nos ocupa en este trabajo la diferencia en potencia de entrada es de 5 dBm, por lo que habría que tenerlo en cuenta a la hora de diseñar el modulo posterior, para asegurar que trabaje en régimen lineal. Los resultados se han corroborado mediante medida en el laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos del MICINN y del CSIC de referencias AYA2007-68058-C03-02 y 200450E405 respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] J.A. Rubiño-Martín, et al., "The QUIJOTE CMB experiment", arXiv:0810.3141v1 [astro-ph], "Highlights of Spanish Astrophysics V", Proceedings of the VIII Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society (SEA), Santander, July, 2008.
- [2] M. Bersanelli, B. Aja, et al. "PLANCK-LFI: Instrument Design and Ground Calibration Strategy" Proceedings of the European Microwave Association (EuMA) VOL. 1; September 2005.
- [3] J.P. Pascual, B. Aja, M.L. De la Fuente, E. Artal, "Radiometer Simulation using RF Platforms", *Proceedings 2004 International Workshop on Electronics and System Analysis*, pp. 119-122, U.P.V/E.H.U. Fac. de Ciencia y Tecnología, Bilbao (España), Oct. 2004.
- [4] F. J. Casas, J. Portilla, R. Quéré, A. Mallet, J. F. Villemazet, "Model-Order Reduction of Linear and Weakly Nonlinear Time-Varying RF and Microwave Circuits", *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*. Vol. 52, No. 9, September 2004, pp. 2262-2274.
- [5] J.P. Pascual, B. Aja, M.L. de la Fuente, T. Pomposo, E. Artal., "System Simulation of a differential Radiometer Using Standard RF-Microwave Simulators", *Simulation, Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, Vol. 81, Issue 11, pp.735-755, Nov. 2005.
- [6] K. M. C. Jeruchim, P. Balaban, K. S. Shanmugan, *Simulation of Communication Systems*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.